

УДК 536.24

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

**Т.Ш. Маграквелидзе, Н.Н. Леквеишвили, Н.О. Банцадзе,  
А.Н. Микашавидзе, Х.Н. Ломидзе**

*Арчил Элиашвили Институт систем управления, Тбилиси, Грузия*

В теплообменных аппаратах, в которых в качестве теплоносителя используются капельные жидкости, как известно, часто имеет место образование на теплоотдающих поверхностях твердых отложений, обуславливающих резкое снижение интенсивности теплоотдачи. В связи с этим, изыскание способов снижения интенсивности отложений имеет большое практическое значение. Одним из таких способов может оказаться метод искусственной шероховатости. Проблеме интенсификации теплоотдачи методом искусственной шероховатости, как известно, посвящено довольно большое количество экспериментальных [1-4] и теоретических [5-7] исследований. Наряду с этим изучению процесса образования отложений на шероховатых поверхностях посвящено ограниченное количество работ, результаты которых зачастую носят противоречивый характер [8,9].

Исходя из сказанного, было проведено данное исследование. Для проведения опытов была изготовлена экспериментальная установка, подробное описание которой дано в [7]. Установка представляла собой замкнутый циркуляционный контур. Циркуляция теплоносителя осуществлялась при помощи центробежного насоса. Для измерения расхода теплоносителя контур был оснащен камерной диафрагмой, к которой был присоединен дифманометр. Опытный участок установки представлял собой вертикально расположенный кольцевой канал, состоящий из наружной трубы внутренним диаметром 14 мм и внутренней обогреваемой трубы с наружным диаметром 10 мм. Общая длина кольцевого канала составляла 0,4 м. (Одна серия экспериментов была проведена с коротким кольцевым каналом общей длиной 0,2 м.). Нижняя не обогреваемая часть кольцевого канала длиной 0,2 м служила участком гидродинамической стабилизации.

Обогрев внутренней трубы осуществлялся путем непосредственного пропускания через нее переменного тока низкого напряжения. Температура стенки опытной трубы измерялась в трех местах этой трубы, последовательно расположенных по ее длине (в случае короткой трубы температура стенки измерялась в конце трубы). Температура теплоносителя измерялась на входе и выходе кольцевого канала. В экспериментах сила тока, падение напряжения, э.д.с. термопар измерялись точными цифровыми приборами. В качестве теплоносителя использовалась сетевая вода жесткостью 3,6 мг-экв/л. Вода в кольцевом канале двигалась снизу вверх. При постоянных значениях теплового потока, температуры, расхода и давления воды на входе кольцевого канала, измерения проводились через каждые 15 мин. При каждом заданном режиме эксперимент проводился в течение 24-28 ч.

Интенсивность образования отложений определялась по снижению во времени коэффициента теплоотдачи. В опытах по измеренным значениям плотности теплового потока и разности температур стенки и жидкости определялись как средний, так и локальные коэффициенты теплоотдачи. Эксперименты были проведены при разных значениях скорости  $u$ , плотности теплового потока  $-q$  и температуры  $-t_{ж}$  теплоносителя как с гладкой, так и с

шероховатыми поверхностями. Шероховатость создавалась путем намотки на опытную трубу проволоки. Высота элементов шероховатости была равна 0.1, 0.2 и 0.3 мм; а отношение шага между элементами шероховатости –  $s$  к их высоте –  $h$  было 5, 12.5 и 25. Одна серия экспериментов была проведена с трубой с лунками. Диаметр лунок составлял 1мм, а глубина – 0,5мм шаг между лунками составлял 1мм.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что создание на поверхности нагрева двумерной шероховатости обуславливает существенное снижение интенсивности образования отложений.

В экспериментах были зафиксированы несколько явлений, которые, по нашему мнению, заслуживают большой интерес.

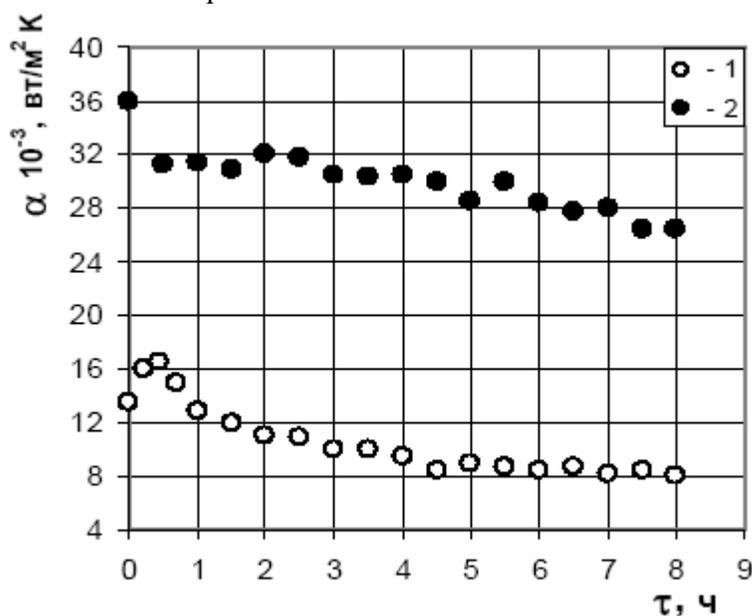


рис.1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени работы установки,  $q=10$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{ж}=70$  С,  $u=1.75$  м/с.  
 1. Гладкая поверхность;  
 2. Поверхность с двумерной шероховатостью,  $h=0.1$ мм,  $s/h=12.5$ .

На рис.1 в координатах  $\alpha, \tau$  представлены данные как для гладкой, так и для шероховатой поверхностей. Эти результаты получены в экспериментах с коротким кольцевым каналом. Как это видно из указанного рисунка, в результате образования отложений, коэффициент теплоотдачи снижается как в случае гладкой, так и в случае шероховатой поверхностей. Однако, при этом, снижение интенсивности теплоотдачи в случае гладкой поверхности имеет более резкий характер, чем в случае шероховатой поверхности. В результате этого отношение коэффициента теплоотдачи шероховатой поверхности –  $\alpha_{ш}$  к коэффициенту теплоотдачи гладкой поверхности –  $\alpha_{г}$  увеличивается от 2.5 в начале экспериментов до 3.4 по истечению 8 часов работы установки.

Заслуживает внимания один очень интересный экспериментальный факт. Как это видно из рис.1, в начальной стадии эксперимента, в случае гладкой поверхности, наблюдается некоторое увеличение во времени коэффициента теплоотдачи. Аналогичное увеличение было зафиксировано в работе [8].

Этот эффект, по нашему мнению, обусловлен следующим обстоятельством. На начальной стадии образования отложений, процесс отложения протекает в т.н. центрах кристаллизации – в углублениях на поверхности нагрева, где созданы наиболее благоприятные условия для кристаллизации. Зародыши отложений, образовавшиеся в центрах кристаллизации, достигая при росте определенных размеров, распределяются на поверхности в виде «островков» и сами начинают «работать» как элементы шероховатости, что обуславливает увеличение интенсивности теплоотдачи.

На рис.2. результаты экспериментов представлены в виде зависимости  $\alpha = f(\tau)$ . На этом рисунке приведены данные для гладкой поверхности, для поверхности с двухмерной шероховатостью и поверхности с лунками. Как это видно из указанного рисунка, коэффициент теплоотдачи поверхности с лунками, в отличие от поверхности с двухмерной шероховатостью, резко снижается с течением времени в результате образования отложений. Этот факт, по-видимому, объясняется тем, что лунки способствуют удержанию отложений на поверхности нагрева. Следовательно, в этом случае затруднен снос отложений потоком жидкости. Результаты, приведенные на рис.2. для поверхности с двухмерной шероховатостью получены при геометрических параметрах шероховатости  $h=0.1\text{мм}$ ,  $s/h=12.5$ . Точно такие же результаты были получены при значениях  $h$ , равных  $0,2\text{мм}$  и  $0,3\text{мм}$ . Таким образом, можно заключить, что увеличение высоты элементов шероховатости не оказывает никакого влияния на процесс образования отложения.

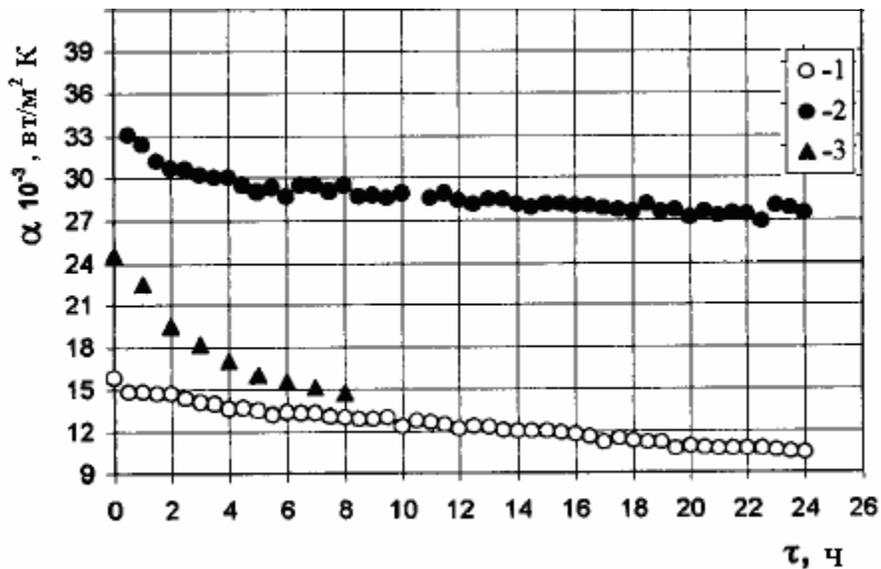


Рис.2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени работы установки,  $q=0.85 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{ж}=70$  С,  $u=1.75$  м/с.  
1. Гладкая поверхность; 2. Поверхность с лунками,  $h=0.5\text{мм}$ ,  $s/h=2$ .  
3. Поверхность с двухмерной шероховатостью,  $h=0.1\text{мм}$ ,  $s/h=12.5$ .

На рис.3 в тех же координатах представлены данные для гладкой и шероховатых поверхностей с геометрическими параметрами шероховатости  $h=0.1\text{мм}$ ,  $s/h=5$ ;  $12.5$ ;  $25$ . Как это видно из указанного рисунка, как и в случае конвективной теплоотдачи без образования отложений наиболее эффективной оказалась двухмерная шероховатость с параметром  $s/h=12.5$ .

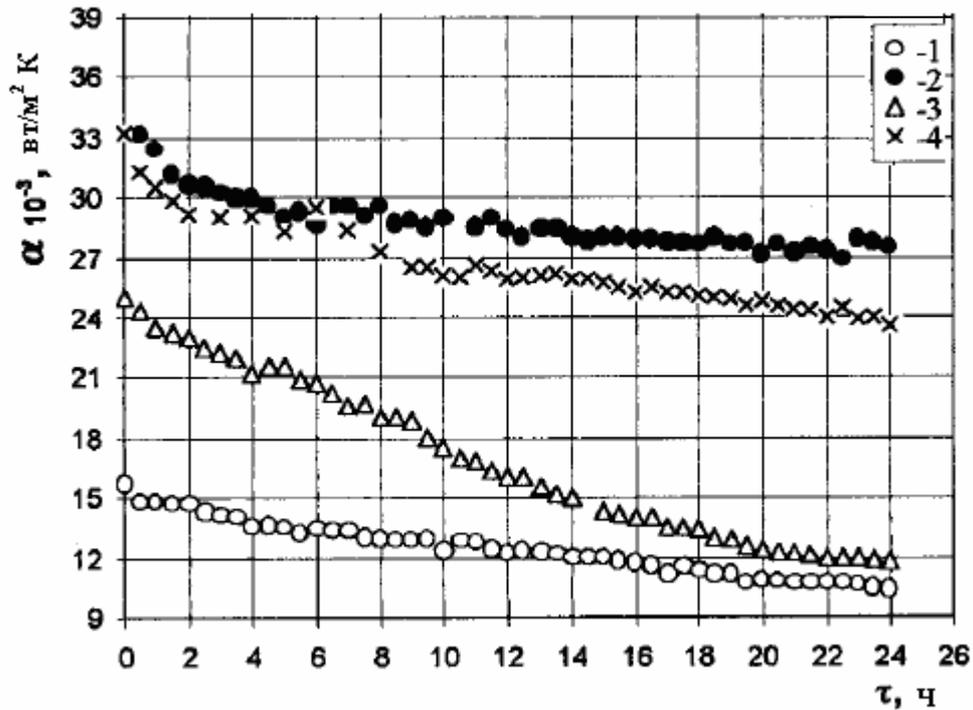


Рис.3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени работы установки,  $q=0.85 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{ж}=70^{\circ}$  C,  $u=1.75$  м/с,  
 1. Гладкая поверхность;  
 Поверхности с двухмерной шероховатостью,  $h=0.1$  мм:  
 2.  $s/h=12.5$ . 3.  $s/h=25$ . 4.  $s/h=5$ .

В наших экспериментах было зафиксировано еще одно весьма интересное явление. Результаты этих экспериментов в виде зависимости  $\delta_{от} = f(\tau)$  представлены на рисунках 4 (гладкая поверхность) и 5 (шероховатая поверхность).

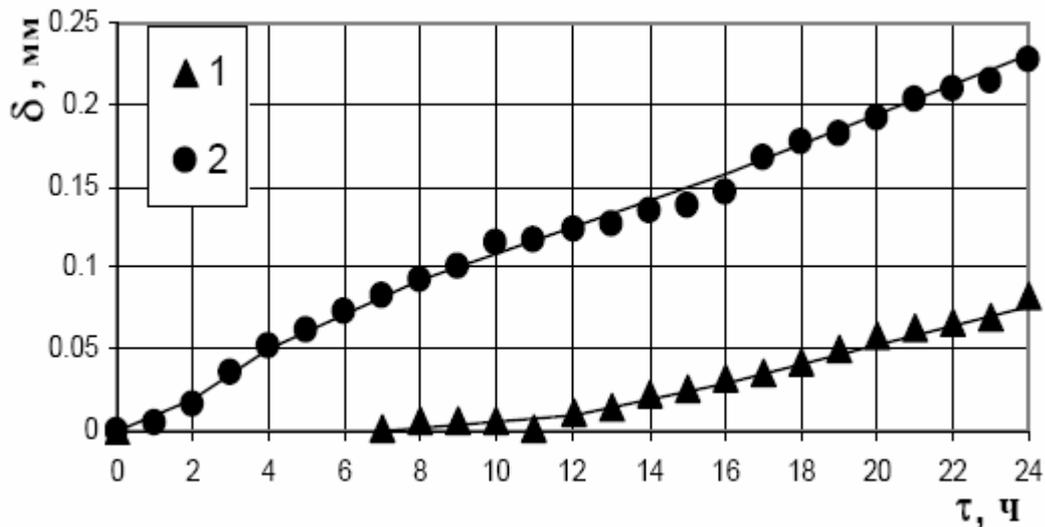


рис.4. Изменение толщины отложения во времени (гладкая поверхность).  
 $q=0.85 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{ж}=80^{\circ}$  C;  $u=1.75$  м/с.  
 1. Данные, полученные по измерениям в середине обогреваемой трубы;  
 2. Данные, полученные по измерениям в конце обогреваемой трубы.

Толщина отложений -  $\delta_{от}$  в этих экспериментах определялась из следующей зависимости:

$$\frac{\delta_{от}}{\lambda_{от}} = \frac{1}{\alpha_{\tau}} - \frac{1}{\alpha_0},$$

где коэффициент теплопроводности отложений –  $\lambda_{от}$  для  $\text{CaCO}_3$  по данным [8] равен 2,2 Вт/м К;  $\alpha_{\tau}$  – коэффициент теплоотдачи по истечении времени  $\tau$  после начала образования отложений;  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи до начала образования отложений.

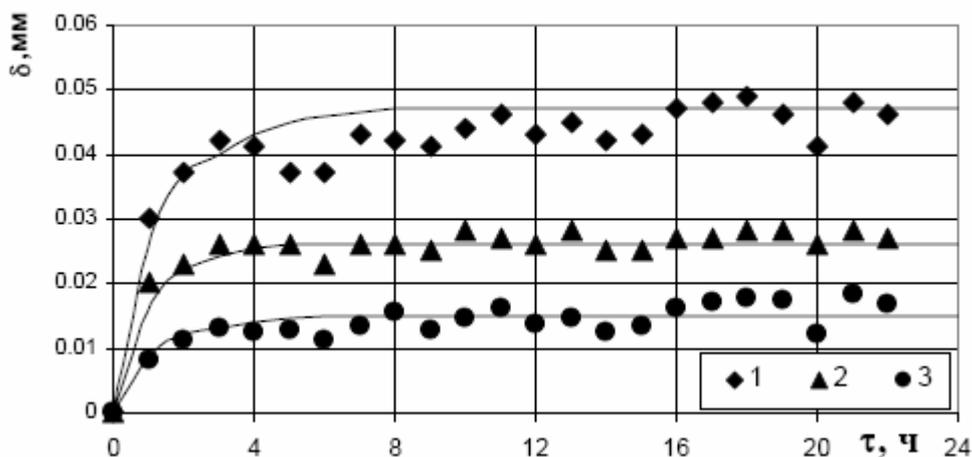


рис.5 Изменение толщины отложений во времени

(шероховатая поверхность  $h=0.1$  мм,  $s/h=12.5$ ).  $q=0.85 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{ж}=80$  °С;  $u=1.75$  м/с.

1. Данные, полученные по измерениям в начале обогреваемой трубы;
2. Данные, полученные по измерениям в середине обогреваемой трубы;
3. Данные, полученные по измерениям в конце обогреваемой трубы.

На рис. 4 не приведены данные измерений на начальном участке гладкой теплоотдающей трубы, поскольку в этом сечении отложения практически не образовались и, соответственно,  $\delta_{от} = 0$ .

Как это видно из указанных рисунков, в случае гладкой поверхности толщина отложений растет, начиная с входного сечения вниз по потоку, а в случае шероховатой поверхности с относительным шагом между элементами шероховатости равным 12,5 имеем совершенно противоположную картину. При других исследованных значениях указанного шага, профиль распределения отложений носит более сложный характер.

Эти экспериментальные результаты, разумеется, заслуживает значительный теоретический интерес. Однако, думается для теоретического объяснения указанного выше необычного явления необходимо провести дальнейшие экспериментальные исследования.

### Литература

- [1] W.Nunner. Wärmeübergang und druckabfall in rauen röhren. VDI Forschungsheft. 1956, 455s.
- [2] В.И.Гомелаури. Влияние искусственной шероховатости на конвективный теплообмен. Труды Института физики АН Грузинской ССР, т IX, 1963, с.111-145.

- [3] Э.К. Калинин, Г.А.Дрейцер, С.А. Ярхо. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972, 219 с.
- [4] Dipprey D.F. and R.H.Subersky R.H. Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various Pr numbers.//Int.J. Heat and mass transfer. 1963. v.6. N5, pp. 329-353.
- [5] Мигай В.К. Теплообмен в шероховатых трубах. // Изв. АН СССР. 1968. т.3. с.97-105.
- [6] Н.М.Галин. Теплообмен при турбулентном течении газов у шероховатых стенок. Теплоэнергетика. №5, 1967, с. 66-72.
- [7] Маграквелидзе Т.Ш. Влияние искусственной шероховатости на процессы конвективной теплоотдачи, пузырькового кипения и образования отложений.//Автореферат док. диссертации. Тбилиси, 1999. 54 с.
- [8] Уоткинсон А., Мартинец О. Образование отложений в трубах теплообменника со спиральными вырезами. Теплопередача, 1975, №3, с.181-183.
- [9] Дрейцер Г.А., Гомон В.И., Аронов И.З. Сравнительные исследования величины отложений в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в гладких трубах кожухотрубчатых теплообменников. Промышленная теплотехника, 1983,N2,с.36-42.